



Associazione per l'Insegnamento della Fisica

Campionati 2026 di FISICA

★★ 40^a edizione! ★★



Gara Nazionale - Prova sperimentale

Senigallia (AN) - giovedì 16 aprile 2026



Ministero dell'Istruzione
e del Merito

I Campionati di Fisica
sono organizzati dall'AIF;
sono finanziati e inseriti dal MIM
nel Programma annuale per la
valorizzazione delle eccellenze.

ISTRUZIONI:

Tempo: 4 ore

**Leggi con attenzione
tutte le istruzioni**

1. Appena ti verrà dato il via, controlla che il **Codice Studente** riportato sulla busta grande, sulla busta piccola e sul cartoncino sia lo stesso.

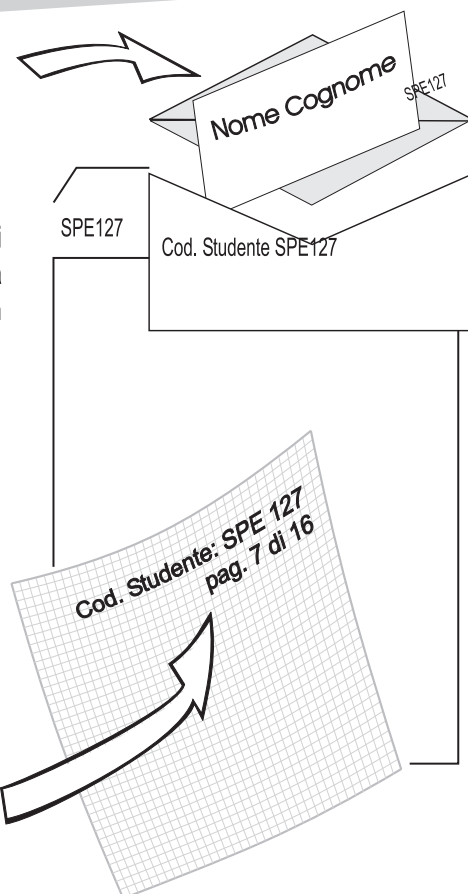
Scrivi chiaro il tuo **NOME e COGNOME** sul cartoncino, poi inserisci il cartoncino nella busta piccola e chiudila **senza incollare il lembo**; metti subito la busta piccola chiusa in quella grande che userai alla fine per consegnare tutti i fogli.

Successivamente, NON dovrai scrivere il tuo nome su nessun foglio né sulle buste,

ma userai solo il tuo "Codice Studente" !

2. Leggi con cura il testo del problema proposto.
3. Su ogni facciata scrivi chiaramente in alto a destra:
 - il tuo **Codice Studente**
 - il **numero di pagina**
 - il **numero totale di pagine** usate per quel problema:
per esempio pag 3 di 4.

Prosegui a leggere anche dietro, quando viene dato il VIA !



Con il supporto di

CASIO
www.casio-edu.it

La Gara Nazionale ha il sostegno del

Liceo Statale "E. Medi" di Senigallia

Istruzioni generali

Leggi attentamente tutto il testo prima di iniziare a lavorare con i materiali a disposizione.

Non ti si chiede una relazione di laboratorio, ma solamente una serie di risposte da scrivere nei fogli appositi.

Ogni risposta deve avere una sua giustificazione sintetica e chiara, anche se non è chiesto esplicitamente nella domanda.

Se, per migliorare un procedimento, adotti accorgimenti significativi, registrati nel corrispondente foglio risposte.

Al termine della prova inserisci i fogli con le risposte e la minuta nell'apposita busta da consegnare.



Materiale elaborato dal Gruppo

PROGETTO OLIFIS

Segreteria dei Campionati Italiani di Fisica

E-mail: segreteria@olifis.it - WEB: www.olifis.it



NOTA BENE:

È possibile utilizzare, riprodurre, distribuire,
comunicare al pubblico questo materiale
alle due seguenti condizioni:

citare la fonte;

non usare il materiale, nemmeno parzialmente, per fini commerciali.

P_{Sp}**PENDOLI ACCOPPIATI****Punti 200****MATERIALI A DISPOSIZIONE**

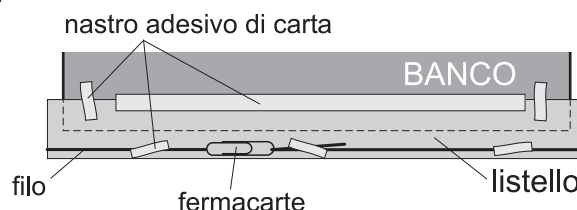
- un filo lungo (lunghezza ≈ 175 cm);
- un secondo filo più corto (lunghezza ≈ 125 cm);
- due dadi da bullone M12 di egual massa M ;
- un fermacarte N.5;
- due fascette metalliche;
- nastro adesivo di carta;
- forbici;
- carta millimetrata;
- due squadrette da disegno;
- listello di legno (lunghezza 75 cm, larghezza 10 cm, spessore 3 cm);
- pinzette.

Strumenti di misura:

- flessometro (metro a nastro);
- cronometro (vedi istruzioni per l'uso a pag. 7).

MONTAGGIO DELL'APPARATO SPERIMENTALE

Fig. 1 – Il banco di lavoro e il listello visti dall'alto. Il listello è fissato al banco col nastro adesivo di carta.



Fissa il listello al banco di lavoro usando il nastro adesivo. Assicurati che il bordo lungo del listello sporga di almeno 3 cm rispetto al bordo del tavolo.

Fissa, con un nodo, il fermacarte a un estremo del filo lungo.

Posiziona il filo lungo attorno al bordo del listello, come è evidenziato nelle Fig. 1 e 2. Fai passare l'estremo libero del filo nell'occhiello prodotto dal fermacarte.

Usa alcuni pezzi di nastro adesivo di carta per bloccare il filo sul listello. Prevedi la loro rimozione nell'eventualità che debba essere modificata la tensione del filo stesso durante le operazioni di misura.

Il filo così predisposto costituisce il *filo di supporto* dei pendoli.

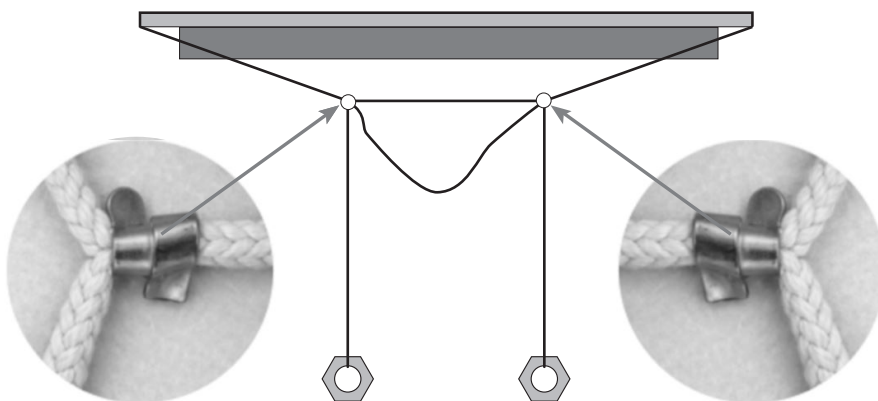


Fig. 2 – Particolare della sistemazione delle lamelle.

Il tratto di filo centrale rettilineo appartiene al filo fissato al listello.

Il tratto centrale di filo non in tensione appartiene al filo collegato ai due dadi.

Annoda i due dadi uno a ciascun estremo del filo corto. Assicurati che, quando il filo è teso, la distanza tra il centro dei due dadi sia uguale a $106\text{ cm} \div 107\text{ cm}$. Per fare in modo che i nodi non si sciolgano durante le misure puoi fasciarli con una piccola striscia di nastro di carta. Successivamente, avvalendoti delle due fascette metalliche (vedi il particolare della Fig. 2), fissa il filo corto al filo di supporto in modo da realizzare due pendoli aventi uguale lunghezza e distanziati $d = (15.0 \pm 0.1)\text{ cm}$ (vedi la Fig. 3). Assicurati che la lunghezza dei pendoli sia $L = (40.0 \pm 0.1)\text{ cm}$. Il montaggio ultimato è rappresentato in Fig. 2. Per sagomare le fascette metalliche puoi avvalerti delle pinzette in dotazione. Fai attenzione alle estremità delle fascette perché sono taglienti.

Le fascette metalliche devono bloccare i pendoli sul filo di supporto ma, all'occorrenza, devono permettere lo scorrimento dei fili quando è necessario regolare le misure di L e/o d .

OSSERVAZIONI PRELIMINARI

Sistema l'apparato in modo che risulti simmetrico rispetto al bordo del listello (vedi le Fig.2 e 3). Quando i pendoli sono fermi, tutti i fili devono giacere sullo stesso piano verticale π . Allontana un dado di circa 5 cm dalla posizione di equilibrio spostandolo perpendicolarmente al piano π , quindi lascialo libero di oscillare. Osserva il comportamento dei due pendoli: essi costituiscono un sistema di oscillatori accoppiati. L'accoppiamento è dovuto al movimento laterale del filo di supporto. Attraverso il filo di supporto, i pendoli interagiscono reciprocamente, influenzando ciascuno il moto dell'altro.

Fino a quando tutte le lunghezze che caratterizzano i tre tratti di filo di supporto sono superiori a 10 cm, gli effetti della torsione dei fili sull'accoppiamento dei pendoli sono trascurabili.

Gli esperimenti qui proposti dovranno essere eseguiti garantendo la simmetria del sistema di supporto dei pendoli (vedi le Fig.2 e 3) e avendo cura che l'ampiezza angolare del moto sia piccola.

PARTE PRIMA – I MODI NORMALI DI OSCILLAZIONE

Di seguito ci riferiremo alla terna cartesiana rappresentata in Fig.3.

Per quanto detto, il moto dei pendoli sarà caratterizzato dalle sole componenti y oscillanti (le componenti x sono automaticamente nulle a causa delle modalità di avvio, mentre per oscillazioni di piccola ampiezza è lecito ritenere che sia sempre soddisfatta la condizione $z \approx \text{costante}$).

È possibile dimostrare che per questi pendoli accoppiati esistono due modi di oscillazione distinti in cui ciascun pendolo oscilla di moto armonico semplice. Ciò accade se il sistema viene messo in movimento rispettando condizioni appropriate di partenza (relative alle posizioni di ciascun dado – $y_A(0); y_B(0)$ – e alle rispettive velocità iniziali). Queste due modalità di oscillazione sono chiamate *modi normali*.

La loro importanza è dovuta al fatto che il moto generale dei pendoli può sempre essere rappresentato come una *sovrapposizione* di questi due *modi normali*.

Il primo *modo* (*modo normale 1*) si ottiene facendo partire simultaneamente da fermi i due pendoli dopo averli spostati dallo stesso lato, in modo da conferire loro la stessa ampiezza $y_A(0) = y_B(0)$ delle oscillazioni. Una volta lasciati liberi di oscillare i dadi manterranno invariata la loro posizione reciproca oscillando in fase.

Il secondo *modo* (*modo normale 2*) si ottiene spostando ciascun pendolo in modo che alla partenza delle oscillazioni risulti $y_A(0) = -y_B(0)$. In tal caso, durante le oscillazioni, il loro centro di massa rimarrà fermo e il tratto centrale del filo di supporto compirà delle oscillazioni, ruotando attorno all'asse verticale di simmetria. I due dadi oscilleranno in controfase.

I periodi che caratterizzano il moto armonico semplice dei pendoli nei due *modi normali* sono rappresentabili con la seguente equazione:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{L + c_i \ell_z}{g}} \quad \text{con } i = 1, 2 \quad \text{rispettivamente per il modo normale 1 e il modo normale 2.} \quad (1)$$

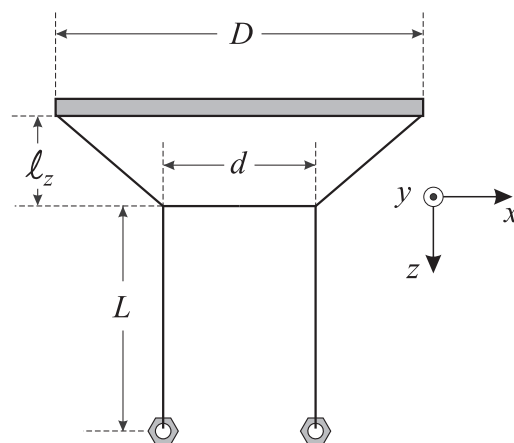


Fig.3 – Definizione delle lunghezze che caratterizzano l'apparato sperimentale.

Q.1.1

[40 p.]

Determina il valore dei coefficienti c_i che caratterizzano le oscillazioni del modo normale 1 e del modo normale 2. Predisponi l'apparato in modo che risultino fissi $L = (40.0 \pm 0.1)$ cm e $d = (15.0 \pm 0.1)$ cm. Lavora per $\ell_z \geq 10$ cm. Non è richiesta la stima delle incertezze.

Suggerimento: si consiglia di lavorare per incrementi di ℓ_z maggiori o uguali a 2 cm e di impiegare per le misure di periodo almeno 30 oscillazioni.

Il secondo modo normale di oscillazione ha un ruolo fondamentale nel determinare il grado di accoppiamento dei pendoli. Il coefficiente c_2 che lo caratterizza dipende anche dalla distanza d . Predisponi l'apparato in modo che risultino fissi $L = (40.0 \pm 0.1)$ cm e $\ell_z = (13.0 \pm 0.1)$ cm.

Q.1.2

[45 p.]

Effettua le misure di periodo necessarie per trovare la funzione $c_2 = f_1(d)$. Scrivila in modo esplicito e forniscine la rappresentazione grafica; non sono richieste le barre di errore. Riporta il dettaglio dei calcoli effettuati.

Suggerimento: imposta valori della distanza d intervallati di 3 cm e impiega un congruo numero di oscillazioni (almeno 30) per ogni misura.

Nell'equazione di moto di ciascun pendolo è presente un termine che descrive l'effetto dovuto all'altro pendolo, attraverso un coefficiente k detto "coefficiente di accoppiamento": questo dipende dalle lunghezze ℓ_z e d : $k = f_2(\ell_z; d)$. La condizione $k = 0$ esprime il disaccoppiamento dei due pendoli. Si può dimostrare che k è a sua volta proporzionale alla differenza dei quadrati delle pulsazioni dei due modi normali, $\omega_2^2 - \omega_1^2$.

Q.1.3

[10 p.]

Fissato il valore di ℓ_z impostato in Q.1.2, e sfruttando le informazioni sin qui ottenute, determina per quale distanza d i pendoli risultano disaccoppiati. Non è richiesta la stima dell'incertezza.

PARTE SECONDA – SOVRAPPOSIZIONE DEI MODI NORMALI – BATTIMENTI

Avvia il sistema spostando un pendolo dalla posizione di riposo in direzione perpendicolare al piano π , lasciando l'altro verticale. Quando il pendolo viene rilasciato si ha uno scambio graduale di energia dal primo pendolo al secondo e viceversa. Il fenomeno che osservi è conosciuto col nome di *battimento* e appare come un fenomeno ciclico.

Si può dimostrare che l'intervallo di tempo necessario perché un ciclo dello scambio di energia si completi è dato da

$$T_{\text{batt}} = \frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1} \quad (2)$$

Tale intervallo di tempo è il *periodo dei battimenti*.

Q.2.1

[25 p.]

Effettua una verifica della formula (2) predisponendo l'apparato in modo che $L = (40.0 \pm 0.1)$ cm, $d = (15.0 \pm 0.1)$ cm e $\ell_z = (20.0 \pm 0.1)$ cm.

PARTE TERZA – Pendoli con lunghezze diverse

Quando le frequenze naturali dei due pendoli sono sensibilmente diverse (cioè quando i pendoli non hanno la stessa lunghezza L), l'ampiezza delle oscillazioni del pendolo spostato per avviare il sistema rimane abbastanza costante ed è sempre molto più grande di quella del secondo pendolo. Ciò nonostante si possono ancora osservare i battimenti. L'osservazione permette anche di dedurre l'esistenza di una relazione tra l'ampiezza angolare massima dell'oscillazione del secondo pendolo e il periodo dei battimenti: quando l'ampiezza angolare massima è piccola, se confrontata con quella del primo pendolo, anche T_{batt} è relativamente piccolo; quando l'ampiezza angolare massima è grande (ma comunque minore di quella che caratterizza il moto del primo pendolo) lo è pure T_{batt} . Di seguito faremo l'**ipotesi** che l'ampiezza angolare massima raggiunta dal secondo pendolo durante le oscillazioni di battimento e il periodo T_{batt} siano **direttamente proporzionali**.

Anche se non è possibile sostenere che il pendolo inizialmente spostato eserciti, sull'altro pendolo, una forza del tipo $F = F_0 \cos \omega t$, con F_0 costante, è ragionevole ipotizzare che, per condizioni sperimentali caratterizzate da debole accoppiamento dei pendoli e basso smorzamento, il pendolo inizialmente lasciato in quiete si comporti approssimativamente come un *oscillatore forzato*⁽¹⁾.

⁽¹⁾ In un oscillatore forzato viene continuamente immessa energia da una forza esterna.

Per verificare sperimentalmente la validità di queste ipotesi dovrai mantenere costante la lunghezza del pendolo che sposti per avviare il sistema e dovrai variare la lunghezza dell'altro. Per distinguerli chiamerai *pendolo pilota* il pendolo la cui lunghezza (L_p) rimane costante e *pendolo forzato* l'altro (la cui lunghezza è L_f).

Per questo esperimento accertati che siano $L_p = (40.0 \pm 0.1)$ cm; $d = (10.0 \pm 0.1)$ cm; $\ell_z = (5.0 \pm 0.1)$ cm.

Q.3.1

[20 p.]

Avvia il sistema spostando il pendolo pilota dalla posizione di riposo, mantenendo l'altro verticale. Assicurati di avviare il pendolo pilota realizzando sempre il medesimo spostamento. Misura il periodo dei battimenti (T_{batt}) in funzione della pulsazione naturale ($\omega_f = \sqrt{g/L_f}$) del pendolo forzato. Varia quest'ultima nel più ampio range di valori che l'apparato consente. Spiega ogni altro eventuale accorgimento che hai adottato per ottimizzare il processo di misura.

Dalla teoria dell'oscillatore forzato si ha che l'ampiezza delle oscillazioni è data da

$$A = \frac{F_0}{m} \frac{1}{\sqrt{(\omega_f^2 - \omega_p^2)^2 + \gamma^2 \omega_p^2}} \quad \text{con}$$

$\omega_f = \sqrt{g/L_f}$: pulsazione *naturale* dell'oscillatore forzato;

$\omega_p = \sqrt{g/L_p}$: pulsazione *naturale* dell'oscillatore pilota;

Il parametro γ , che nel caso di un oscillatore forzato rappresenta lo smorzamento, in questo caso va inteso come un coefficiente che deve dar conto del continuo scambio di energia tra i due oscillatori. Se i pendoli non sono perfettamente accordati sulla stessa lunghezza, l'energia fornita dalla forza esterna viene scambiata tra i modi del sistema grazie al grado di accoppiamento. Il parametro serve dunque a completare il modello dell'oscillatore forzato estendendolo al caso di due oscillatori accoppiati con frequenze naturali diverse.

Poiché non è dato di conoscere il rapporto F_0/m , si può costruire il rapporto tra il valore assunto da A in corrispondenza della generica pulsazione ω_f e il valore A_0 assunto dall'ampiezza A per $\omega_f = \omega_p$.

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\gamma \omega_p}{\sqrt{(\omega_f^2 - \omega_p^2)^2 + \gamma^2 \omega_p^2}}.$$

Inoltre, sfruttando le misure ottenute, si può calcolare il rapporto

$$R = \frac{T_{\text{batt}}}{T_{\text{batt},0}}.$$

in cui $T_{\text{batt},0}$ è il periodo dei battimenti per $\omega_f = \omega_p$. In base all'ipotesi $T_{\text{batt}} \propto A$ si può, infine scrivere

$$R = \frac{\gamma \omega_p}{\sqrt{(\omega_f^2 - \omega_p^2)^2 + \gamma^2 \omega_p^2}} \quad (3)$$

Q.3.2

[40 p.]

Trasforma la formula (3) in modo da ottenere un'equazione del tipo $\omega_f^2 = f_3(R)$. Rappresenta il risultato sul piano cartesiano facendo una scelta appropriata delle variabili che ti consentano di riconoscere facilmente un'eventuale dipendenza lineare. Non sono richieste le barre di errore. La costruzione grafica che ottieni conferma o no l'ipotesi $T_{\text{batt}} \propto A$? Motiva la risposta. Deduci dal grafico il valore della pulsazione di risonanza ω_r e i valori che assume il coefficiente γ .

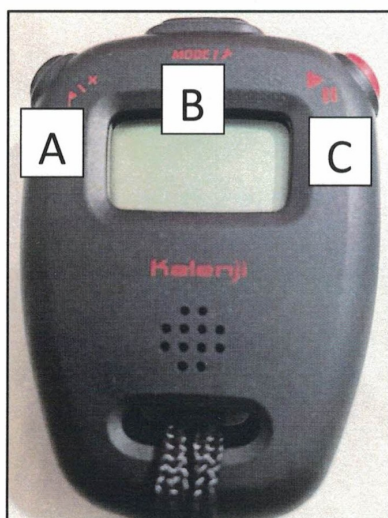
Q.3.3

[20 p.]

Costruisci il grafico del periodo dei battimenti (T_{batt}) in funzione della pulsazione naturale (ω_f) del pendolo forzato. Anche in questo caso non sono richieste le barre di errore. Calcola il periodo dei battimenti previsto nel caso in cui si verifichi la condizione $\omega_f \ll \omega_p$.



Istruzioni per l'impiego del cronometro



Tasto **A**: Azzerà

Tasto **B**: Impostazioni

Tasto **C**: Avvio / Pausa

ACCENSIONE

Per accendere il cronometro premere e tenere premuto per 2 s un pulsante qualsiasi

USO DEL CRONOMETRO

- | | |
|--|--|
| Per scegliere la modalità CRONOMETRO -> | Premere più volte il tasto B per selezionare la modalità cronometro (<i>la prima icona a sinistra in basso nello schermo</i>) |
| Per far partire il cronometro (START) -> | Premere il tasto C |
| Per mettere in pausa (STOP) -> | Premere il tasto C |
| Per azzerare (RESET) -> | Premere il tasto A quando il cronometro è in pausa |